

Metamorfosis espacio-temporal de la precipitación en dos ciudades del altiplano mexicano: Santiago de Querétaro y San Juan del Río

Spatiotemporal Metamorphosis of the Precipitation in Two Cities of the Mexican Highlands: Santiago de Queretaro and San Juan del Rio

Ana Gabriela Godínez-Tovar, Marlen López-Gutiérrez, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México
Carlos Alberto Mastachi-Loza, Carlos Díaz-Delgado, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México

Enrique González-Sosa, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

Rocío Becerril-Piña*, Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México

*Autor de correspondencia: rbecerruko@uaemex.mx

RESUMEN. La urbanización cambia las propiedades de la superficie, lo que conlleva a la modificación de los procesos dinámicos en la capa límite y al balance de energía de superficie. Por lo tanto, la urbanización incuestionablemente afecta la hidrología en una ciudad o cuenca urbana. En la escala regional y local, las mayores afectaciones en la hidrología se relacionan con los cambios en los patrones de la precipitación, de aquí la importancia de analizar, en la escala espaciotemporal, la dinámica de la precipitación. Santiago de Querétaro y San Juan del Río son ciudades de gran importancia socioeconómica, que desde los años ochenta han presentado uno de los crecimientos urbanos más pronunciados a pesar de localizarse en una región con baja disponibilidad hídrica, que además se localizan en el extremo del desierto de Chihuahua. En una primera aproximación, en torno a la relación urbanización-precipitación, se analizaron las tendencias mensuales de la precipitación a partir de la base de datos diaria de precipitación de Daymet del periodo 1980-2016. Los resultados indican que ambas ciudades presentan ciertas semejanzas en el comportamiento temporal de la precipitación mensual. Sin embargo, se observan diferencias significativas en el comportamiento espacial de la precipitación mensual para cada ciudad, lo que podría estar relacionado con la composición, estructura y tamaño de la mancha urbana de cada ciudad.

PALABRAS CLAVE: precipitación, urbanización, tendencia, espaciotemporal

ABSTRACT. Urbanization changes the properties of the surface, which leads to the modification of the dynamic processes in the boundary layer and in the surface energy balance. Therefore, urbanization affects hydrology in a city or urban basin. At the regional and local scales, the greatest impacts on hydrology are related to changes in precipitation patterns, hence the importance of analyzing the dynamics of precipitation on the space-time scale. Santiago de Querétaro and San Juan del Río are cities of great socioeconomic importance, which since the eighties have presented one of the most pronounced urban growth despite being in a region with low water availability. In a first approximation around the urbanization-precipitation relationship, the monthly precipitation trends were analyzed from the daily Daymet precipitation database of the period 1980-2016. The results indicate that both cities show certain similarities in the temporal behavior of monthly precipitation. However, significant differences are observed in the spatial behavior of the monthly rainfall for each city, which could be related to the composition, structure and size of the urban sprawl of each city.

KEYWORDS: precipitation, urbanization, trend, spatiotemporal

Introducción

La urbanización es una serie de cambios y alteraciones que comienza con la ocupación de tierras rurales, seguida de agrupaciones residenciales, comerciales e industriales hasta llegar a un espacio completamente hecho por el hombre. Los nuevos espacios se transforman en áreas impermeables, aumentando el volumen de escorrentía, pico de inundación y reduciendo el tiempo de concentración. La urbanización cambia las propiedades de la superficie, tales como albedo, emisividad y conductividad térmica. Estas diferencias conllevan a la modificación de los procesos dinámicos en la capa límite y en el balance de energía de superficie (Wang, Feng, Yan, Hu, & Jia, 2012). Por lo tanto, la urbanización incuestionablemente afecta la hidrología (Cheng & Wang, 2002) en una ciudad o cuenca urbana.

La precipitación es una de las variables más importantes en la hidro-meteorología (Sayemuzzaman & Jha, 2014). Los cambios en los patrones de precipitación pueden conducir a inundaciones, sequías, pérdida de biodiversidad, afectaciones económicas y sobre todo pérdidas humanas. En la escala regional, los daños más graves se relacionan con la precipitación (Qian & Lin, 2005). Las pérdidas humanas y económicas podrían aumentar ante los escenarios de cambio climático, debido a los cambios en los patrones de distribución, magnitud e intensidad de la precipitación. Si bien es cierto, en términos globales se espera un incremento en la precipitación, en la escala regional se esperan ambos cambios: disminución e incremento.

Asimismo, son diversos los estudios donde la comunidad científica ha presentado teorías y estudios prácticos para describir cómo la urbanización influye en el proceso de precipitación (Shepherd, Stallins, Jin, & Mote, 2010). Si bien son diversos los enfoques, escalas y condiciones, se concluye como vital el diagnóstico para la predicción y gestión de los recursos urbanos, toda vez que de ello depende el mantenimiento y desarrollo de los centros urbanos. De aquí la importancia de analizar y caracterizar la tendencia de la precipitación en la escala regional y local.

Por lo cual, este estudio pretende sentar bases que contribuyan al entendimiento de la interacción de los procesos naturales y antrópicos, en dos de las ciudades más importantes del estado de Querétaro; Santiago de Querétaro y San Juan del Río, ciudades que desde los años ochenta han presentado uno de los crecimientos urbanos más pronunciados

(Serna Jiménez, 2010), por su cercanía a la Ciudad de México y por ser paso obligado en el centro del país (Becerril-Piña, 2015). Se analizaron las tendencias mensuales de la precipitación para las dos ciudades a partir de registros climatológicos diarios desde el año 1980 hasta el año 2016.

Efectos de la urbanización en la precipitación

Alrededor del mundo se han registrado alteraciones en la variabilidad espacial y temporal de parámetros climáticos, principalmente la precipitación, que van desde El Cairo, Tokio, Londres, Atlanta, París, Japón, China, a Taipei, es decir, las ciudades de todas las condiciones culturales y físicas han sido el foco de una investigación formal, provocada por el crecimiento excesivo de la población y la transformación de la superficie (Shepherd et al., 2010). Diversos autores han centrado su atención y esfuerzos por comprender la interacción urbanización-precipitación. Horton (1921) fue uno de los pioneros quien señaló una tendencia en la formación de tormentas sobre las grandes ciudades a diferencia de ciudades cercanas de tipo rural. Asimismo, los trabajos de Thomas (1956) también señalaron los impactos potenciales de las grandes áreas urbanas sobre los patrones de lluvia. Changnon et al. (1976) evaluaron el comportamiento anómalo de la precipitación en el Noreste de Indiana, hoy día conocida como "la anomalía La Porte". En los años de 1970 en los Estados Unidos se llevó a cabo el proyecto Metropolitan Meteorological Experiment (METROMEX) (Huff & Vogel, 1978) para evaluar los efectos de la urbanización sobre la precipitación. Los resultados del METROMEX demostraron que los efectos urbanos conducen a una mayor precipitación durante los meses de verano (Changnon Jr et al., 1976; Huff & Vogel, 1978). Además, que la extensión y magnitud de las anomalías de precipitación urbana y de viento estaban relacionadas con el tamaño del área urbana (Changnon, 1992).

A nivel nacional, los efectos de la urbanización sobre fenómenos climáticos han sido analizados en algunas ciudades del país. En la Ciudad de México Jauregui y Romales (1996) relacionaron el crecimiento urbano con las anomalías de la precipitación convectiva. Asimismo, Magaña et al. (2003) encontraron un incremento en el número de tormentas convectivas, pasando de 4 en 1960 a 20 en 1980, atribuyendo estos cambios al efecto de la isla de calor urbana (ICU). Por otro lado, para el periodo 1985 a 1993 se reportó

que los registros de precipitación mensuales mostraron un aumento de 5 mm al año en la parte Oeste de la Ciudad de México (Ochoa, Quintanar, Raga, & Baumgardner, 2015). En Xalapa, Tejeda & Acevedo (1990) identificaron para el periodo 1923-1988 un incremento en la temperatura media anual vinculada al aumento de la mancha urbana; sin embargo, las precipitaciones no mostraron ninguna tendencia. En Toluca se detectó un incremento en las precipitaciones, a partir de la década de 1990 pasando de una media anual en la ciudad de 760 mm a 805 mm, lo que podría estar vinculado con la formación de la ICU (Méndez, Uribe, & Becerril, 2007).

Análisis de tendencias

El análisis de tendencia de una variable meteorológica es un procedimiento estadístico, que a través de pruebas de hipótesis explica el cambio de la variable, arroja la tasa de cambio respecto al tiempo o espacio geográfico, ayuda a identificar regiones y épocas vulnerables a dichos cambios; y responde a la pregunta: ¿el clima está cambiando o se mantiene constante (Ruíz Álvarez et al., 2016). Una de las pruebas más empleadas en el análisis de series temporales es el estimador no paramétrico Theil-Sen (TS). Es un análisis que se caracteriza por su robustez frente a valores extremos, ya que la estimación de la pendiente media TS no se ve afectada por valores que superen el 29% de la longitud total de la serie. Las tendencias de la serie temporal se calculan obteniendo la pendiente de las medianas para cada punto. Se calcula mediante la determinación de la pendiente entre todas las combinaciones de pares y luego se encuentra el valor de la mediana. La estimación de tendencia Theil-Sen usualmente se combina con el test Mann-Kendall. Este test estadístico se utiliza para calcular la significancia de tendencia en las series de tiempo (Hirsch & Slack, 1984), la principal razón para la aplicación de este test, en relación con otras técnicas paramétricas radica en ser el indicado para distribuciones que no presentan normalidad estadística: como frecuentemente ocurre en las series hidroclimáticas (Godinez-Tovar & Lopez-Gutierrez, 2018).

Metodología

Área de estudio

El estado de Querétaro se encuentra en el Centro-Bajo de la República mexicana, comprendiendo un área

11,978 km². La Ciudad de Santiago de Querétaro (SQ) ubicada en la porción suroeste del Estado de Querétaro (20°35'34.8"N, 100°23'31.6"W), cuenta con una extensión territorial de 690 km², a una altura de 1820 msnm, cuya área metropolitana es la decimoprimerá más grande del país. La Ciudad de San Juan del Río (SJR), se localiza al Sureste de la entidad (20°23'20"N, 99°59'47"W), a una altura de 1920 msnm, su periferia se encuentra rodeada en gran parte de cultivos, mayoritariamente en la porción norte de la ciudad. El Municipio de Querétaro cuenta con tres tipos de clima, templado-subhúmedo, semiseco-semicálido y semiseco-templado; el semiseco-semicálido está presente en el centro de la ciudad, con una temperatura media anual que oscila entre los 18° y 22° C, por lo general se presentan lluvias convectivas. En el municipio de San Juan del Río predomina el clima semiseco-templado con precipitación entre 485-700 mm y temperatura entre 12 y 18°C (Godinez-Tovar & Lopez-Gutierrez, 2018).

El Estado de Querétaro cuenta con 2,038,372 habitantes según la encuesta intercensal INEGI realizada en el 2015, del cual el 56.3% se concentra en dos ciudades principales Querétaro (878, 931 habitantes) y San Juan del Río (268, 408 habitantes), con una densidad de población de 303 hab/km² y 225 hab/km², respectivamente (Cortés, Arzate Flores, & Lozano Guzman, 2012).

La ciudad SQ presenta una mayor urbanización con respecto de la ciudad de SJR, ya que se aprecia que en las periferias hay un mayor número de estructuras urbanas y en menor proporción se observa cultivo en el suroeste de la ciudad, pero a pesar de que en SQ se observa más urbanizada también cuenta con más vegetación y cuerpos de agua dentro de la misma, a diferencia de SJR en que casi no muestra áreas verdes y presenta alta fragmentación (Figura 1).

Método

Se construyó una base de datos de precipitación diaria del periodo 1980 al 2016 para la zona de estudio. La base se recuperó de Daymet Versión 3, se trata de una colección de estimaciones grid de parámetros climáticos diarios generados por interpolación y extrapolación de observaciones meteorológicas diarias con resolución espacial de 1km². A fin de obtener la precipitación total mensual (PPTOT) se sumaron los días correspondientes a los doce meses de los 36 años. A fin de determinar si existen cambios significativos

ANA GABRIELA GODÍNEZ-TOVAR, MARLEN LÓPEZ-GUTIÉRREZ, CARLOS ALBERTO MASTACHI-LOZA, CARLOS DÍAZ-DELGADO, ENRIQUE GONZÁLEZ-SOSA Y ROCÍO BECERRIL-PIÑA (pp. 112-118)

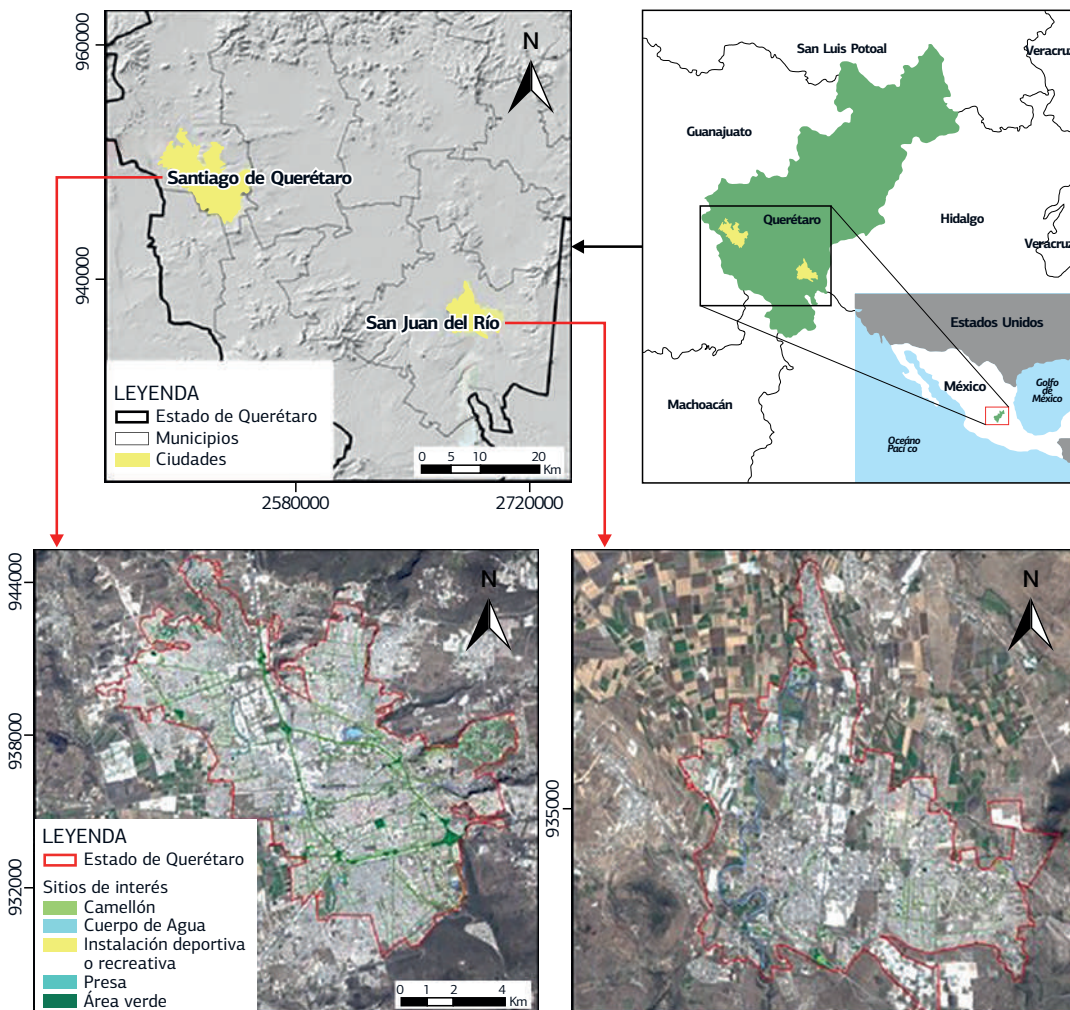


FIGURA 1. Localización y delimitación de las ciudades Santiago de Querétaro y San Juan del Río.



FIGURA 2. Metodología para determinar variación espaciotemporal de la PPTOT en Querétaro y San Juan del Río.

en la precipitación mensual en cada ciudad se calculó la pendiente y significancia (Figura 2).

Finalmente, se recategorizaron los valores de significancia en cuatro rangos por probabilidad de cambios, esto con el objetivo de identificar espacialmente aquellas zonas con mayor cambio en la precipitación mensual. En tanto que para los valores de pendiente se asignaron 14 rangos a fin de visualizar con mayor detalle los cambios ocurridos en cada ciudad.

Resultados y discusión

En el análisis realizado se identificó disminución de la lluvia mensual para los meses de enero, febrero, marzo, abril, agosto, octubre y diciembre para Santiago de Querétaro y San Juan del Río, con excepción de agosto para esta última, con una reducción de -0.65 mm/mes/año , ($-23.4 \text{ mm/mes/36 años}$), con una probabilidad de ocurrencia de $p < 0.20$, quizá la disminución puede estar ligada al aumento de lluvias

ANA GABRIELA GODÍNEZ-TOVAR, MARLEN LÓPEZ-GUTIÉRREZ, CARLOS ALBERTO MASTACHI-LOZA, CARLOS DÍAZ-DELGADO, ENRIQUE GONZÁLEZ-SOSA Y ROCÍO BECERRIL-PIÑA (pp. 112-118)

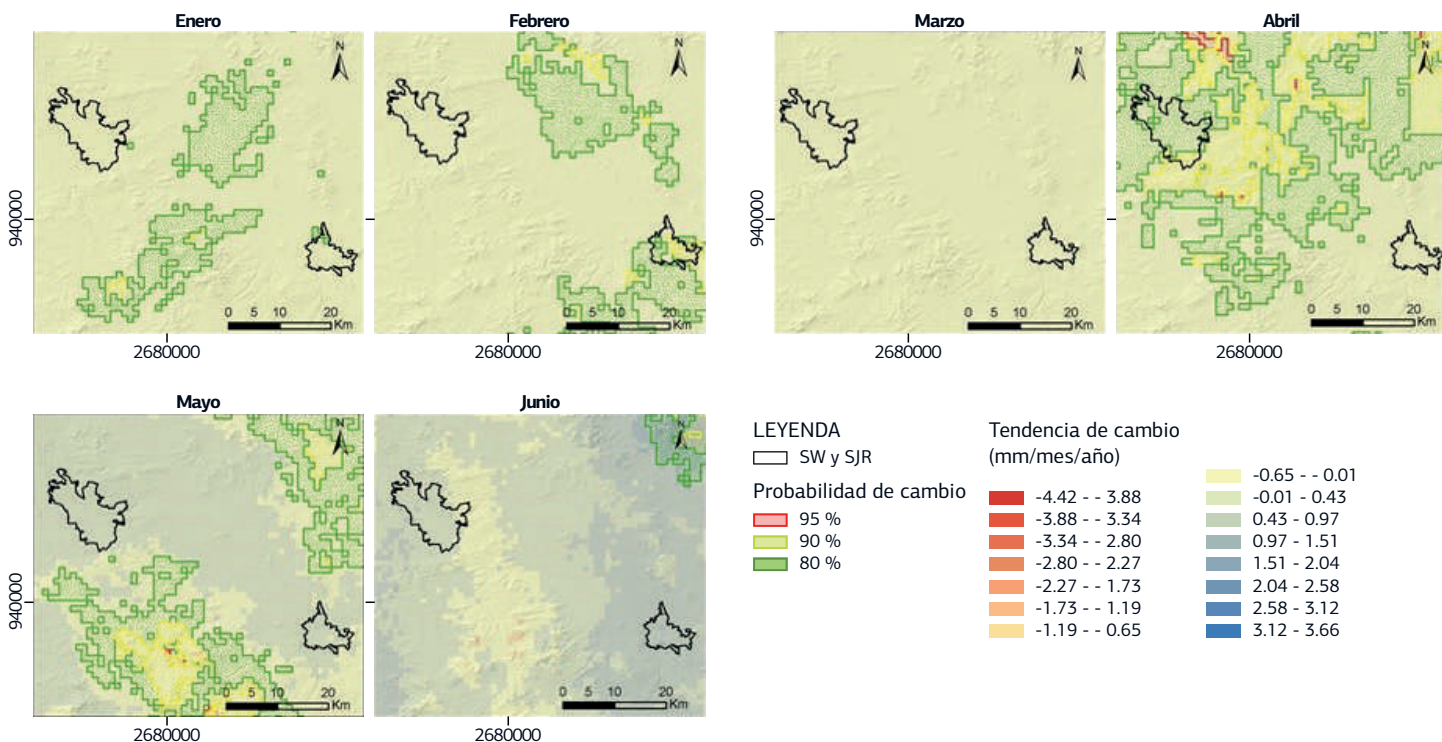


FIGURA 3. Tendencia de precipitación mensual (Enero-Junio) para Santiago de Querétaro (SQ) y San Juan del Río (SJR), para el periodo de análisis 1980-2016.

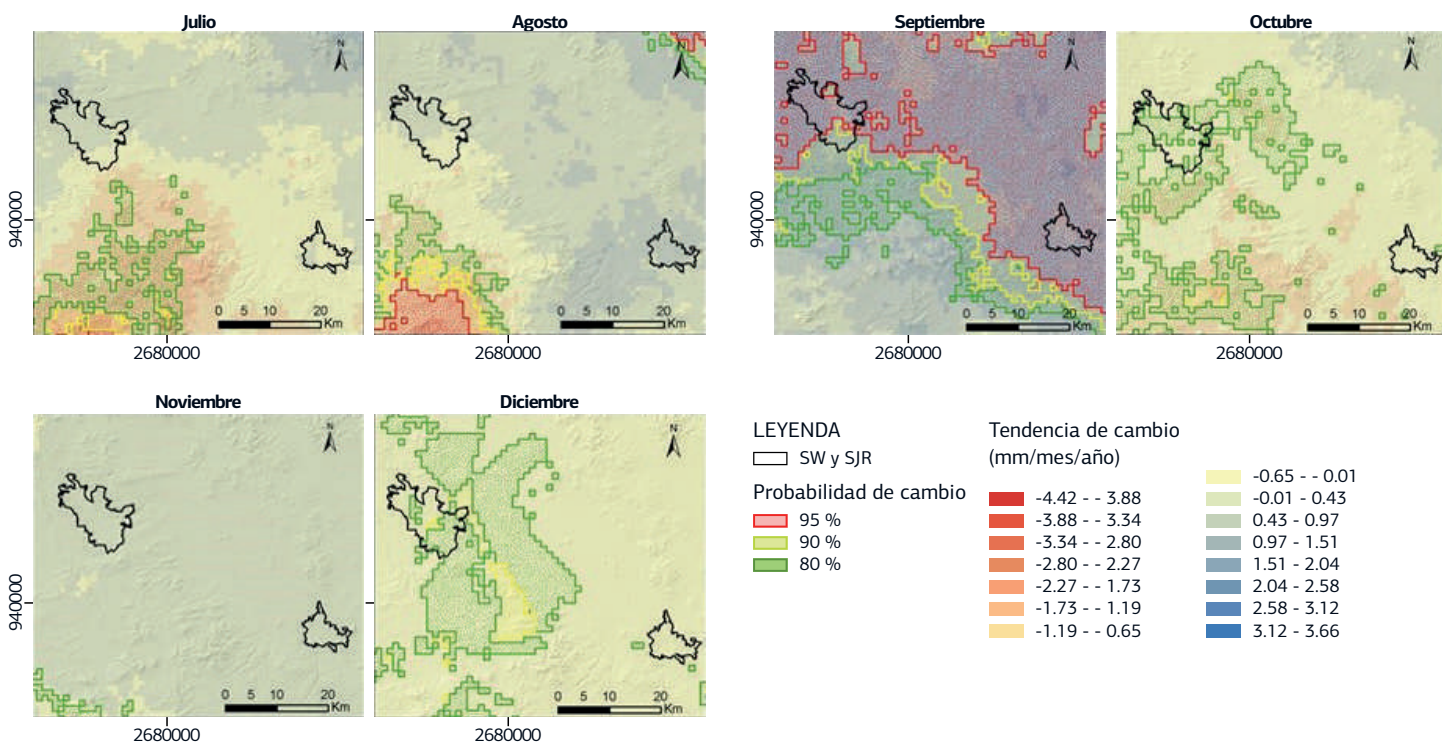


FIGURA 4. Tendencia de precipitación mensual (Julio-Diciembre) para Santiago de Querétaro (SQ) y San Juan del Río (SJR), para el periodo de análisis 1980-2016.

en los meses anteriores, lo que tuvo como efecto ese cambio (Figura 3 y 4).

Para los meses de mayo, junio, julio y noviembre registraron un aumento de 0.43 a 1.51 mm/mes/año en ambas ciudades. En el caso de Santiago de Querétaro los cambios se observaron solo en la parte norte de la ciudad. En el caso de mayo, junio y julio presentan un aumento relativamente uniforme, los últimos tres meses antes mencionados, muestran algunos pixeles dentro de las ciudades que corresponden a un porcentaje de reducción de la lluvia, estos se presentan en una pequeña porción. Para el caso de junio en Santiago de Querétaro se observa aumento en la porción sureste. Para el mes de julio se observa un aumento en ambas ciudades, aunque principalmente en SJR, poco más de la mitad de la ciudad y para el mes de agosto solo en el sur de la ciudad Santiago de Querétaro. Este aumento es de aproximadamente 15.48 a 54.36 mm al mes en 36 años (Figura 3, 4).

En el mes de septiembre puede observarse el mayor incremento de lluvia y la mayor probabilidad ($p < 0.05$) de que este cambio ocurra, volviéndose considerable el aumento debido a que se trata de una región semiárida, teniendo un aumento de 1.51 a 2.04 mm/mes/año (54.36 a 73.44 mm/mes/36 años), pudiéndose asociar a que se trata del mes más lluvioso del año para la región.

En términos generales, el comportamiento de la PPTOT mensual fue notbale, la mayoría de los meses presentan una tendencia positiva de 0.2 a 0.78 mm/mes/año (7.2 a 28.08 mm/mes/36 años). Los valores máximos se presentaron para los meses de agosto y septiembre, con un máximo de 0.97 a 1.51 mm/mes/año (34.92 a 54.36 mm/mes/36 años), pudiéndose decir que en el mes de septiembre no solo incrementa el número de días con precipitación, sino que también se incrementa los milímetros mensuales. Los resultados encontrados concuerdan con los reportados por Changnon Jr et al. (1976) y Huff & Vogel (1978) donde relacionan que los centros urbanos tienen efecto en la cantidad de precipitación durante el verano.

Conclusiones

La tendencia de la precipitación media mensual en las dos ciudades analizadas presenta variabilidad espacial y temporal. En la ciudad de Santiago de Querétaro se observa que en la temporada de

primavera aumenta la intensidad de la precipitación, pero en verano disminuye la frecuencia, en tanto que los meses de noviembre y diciembre no muestran cambios significativos. Comportamiento similar se observa en la ciudad de San Juan del Río para la estación invernal sin cambios, no así en el mes de junio donde aumenta la intensidad y frecuencia de precipitación.

Los resultados expuestos pretenden ser una primera aproximación a la caracterización y entendimiento de la interacción urbanización-precipitación. Si bien es cierto, se logró identificar los cambios espaciotemporales, se hace necesario vincular factores físicos como la temperatura de superficie a fin de identificar los efectos de la Isla de Calor Urbana sobre la precipitación.

Agradecimientos

Este estudio es parte del trabajo de tesis de Licenciatura de Ana López-Gutiérrez y Marlen Gabriela Godínez-Tovar, las cuales agradecen el apoyo bajo la modalidad de beca a través del Proyecto de Problemas Nacionales CONACyT 248498. Los autores agradecen también al Laboratorio de Matemática Aplicada y Cómputo de Alto Rendimiento del Departamento de Matemáticas por el uso del Sistema de Supercómputo Abacus-I.

REFERENCIAS

- Godínez-Tovar, A. G., & López-Gutiérrez, M. (2018). *Dinámica de la isla de calor urbana y su efecto en la distribución espacio-temporal de la lluvia en las ciudades de Querétaro y San Juan del Río* (Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Becerril-Piña, R. (2015). *Estimación de la evapotranspiración en la zona semiárida de México mediante teledetección*. UAEMex, Toluca, México.
- Changnon Jr, S. A., Semonin, R. G., & Huff, F. (1976). A hypothesis for urban rainfall anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, 15(6), 544-560.
- Changnon, S. A. (1992). Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(5), 619-627.
- Cheng, S., & Wang, R. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, 16(7), 1403-1418.
- Cortés, S., Arzate Flores, J. A., & Lozano Guzman. (2012). *Tolo II: El valle de Queretaro y su Geoentorno. Capítulo 2: El ciclo del agua y variaciones climáticas en el Valle*

- de Querétaro. Gonzalez-Sosa et al., (Colección FUNDAP Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P. J., McDonald, R. I., Seto, K. C. (2013). *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment*. Springer.
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727-732.
- Horton, R. E. (1921). Thunderstorm-breeding spots. *Monthly Weather Review*, 49(4), 193-193.
- Huff, F., & Vogel, J. L. (1978). Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. *Journal of Applied Meteorology*, 17(5), 565-577.
- Jauregui, E., & Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 30(20), 3383-3389.
- Magaña, V., Pérez, J., & Méndez, M. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional*, 42(2), 247-259.
- Méndez, C. C. M., Uribe, D. M., & Becerril, L. A. G. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *CIENCIA ergo-sum*, 14(3), 307-316.
- Ochoa, C. A., Quintanar, A. I., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2015). Changes in intense precipitation events in Mexico City. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1804-1820.
- Qian, W., & Lin, X. (2005). Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 90(3-4), 193-207.
- Ruíz Álvarez, O., Espejel Trujano, D., Ontiveros Capurata, R. E., Enciso, J. M., Galindo Reyes, M. A., Quesada Parga, M. L., Ruíz Corral, J. A. (2016). Tendencia de temperaturas máximas y mínimas mensuales en Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (13).
- Sayemuzzaman, M., & Jha, M. K. (2014). Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina, United States. *Atmospheric Research*, 137, 183-194.
- Serna Jiménez, A. (2010). Industria y territorio rural: la constitución de un corredor agropecuario e industrial en el estado de Querétaro. *Región y sociedad*, 22(48), 77-111.
- Shepherd, J., Stallins, J., Jin, M., & Mote, T. (2010). Urbanization: Impacts on clouds, precipitation, and lightning. *Urban ecosystem ecology*, (urbanecosysteme), 1-27.
- Tejeda, M., & Acevedo, F. (1990). Alteraciones climáticas por la urbanización en Xalapa, Ver. *La Ciencia y el Hombre*, (6).
- Thomas, W. L. (1956). Man's Role in Changing the Face of the Earth. *Chicago, London*, 10-13.
- Wang, J., Feng, J., Yan, Z., Hu, Y., & Jia, G. (2012). Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D21).

